

SCR におけるオン・オフ動作の図解について

齊 藤 清 吉^{*}

An Illustration of the Switching Performance of SCR

Seikichi SAITO

(Received Oct. 15, 1972)

SCRs are now in wide use, but understanding their switching performance physically is not always easy for new-comers in this field such as students who do not have a deep understanding on switching devices.

In this paper we present a way of illustrating the on-off performance of the SCR by which the performance can be explained simply by the potential distribution and the behaviors of electrons and holes.

1 緒 言

トランジスタにおけるオン・オフ動作については、図1のごとき図解が容易に与えられ、初めて学ぶ者の理解を助ける上で捨てがたいものといえる。一方、サイリスタとくにSCRにおけるオン・オフ動作について、この種の図解というはいまだ与えられておらず、理解への到達がいちぢるしく阻害されている現状にある。

要領を異にする図解の試みも、2, 3なされてはいるが、初めて学ぶ者をして膝を叩かしむる域に達しているものはいまだ見あたらない。

それが、単に特性曲線上の動作点を追うということに終始するのではなくして、そういう特性をもたらししている原因をも了解せしむるものでなければ、原理図解たりえないわけである。

ここで報ずるものは、あくまでも電位分布と電荷だけをもって、動作の必然を追うという建前に徹した、作図を完成しようと試みたものである。

したがって、専門の立場からの定量性やデテールにわたる綿密性については、充足しきれない面が生ずる懸念がつきまとうのも、ある程度やむをえないこととなる。

しかし、図解なるものの真価を損なうことなく保持させるために、ここでは定性的ながらも、似て非なるモデルに陥ることを極力避け、イミテーション化する

ことなく何処までシミュレートしてゆけるかの追及に、意をそそぐことにしているものである。

2 動作前の状態描写

前掲図1の、トランジスタの場合の要領に準じたSCRの図解といえ、結局図2のごときものになると思われる。

図2にて、電源端子(+)側の導通の担い手であるホールは、電位の堤防(I)に抑えられて、右下の電源端子(-)に向って流れ降ることができないでいる。また一方、電源端子(-)側の導通の担い手である電子は、逆転した電位の堤防(II)に妨げられ、左上の電源端子(+)に向って流れ昇ることができずにいる。

結局、いずれの電荷をもってしても、導通が許されていない状態、つまりオフ状態に置かれているわけである。

ちなみに、ホールは、あたかも空中の水滴が重力で滴り落ちようとしているに似ており、また電子は、水中の気泡が浮力で浮き上がりたがっているに似ている、という連想で眺めることができよう。

3 動作過程の状態描写

ゲート・パルスが与えられることによって、堤防(II)に+の電荷が注入されると、当然その部分の電

^{*} 電気工学科

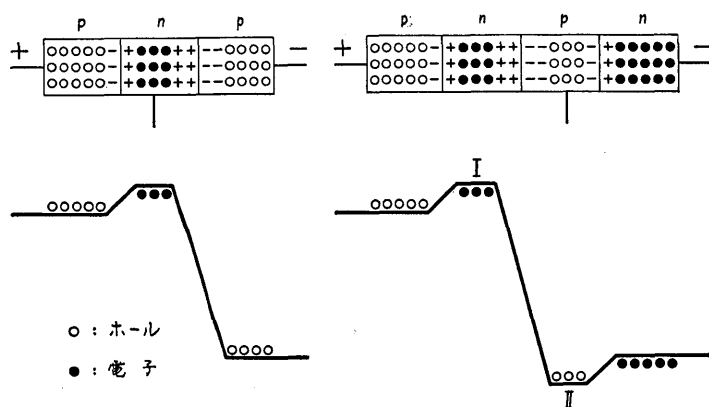


図 1

図 2

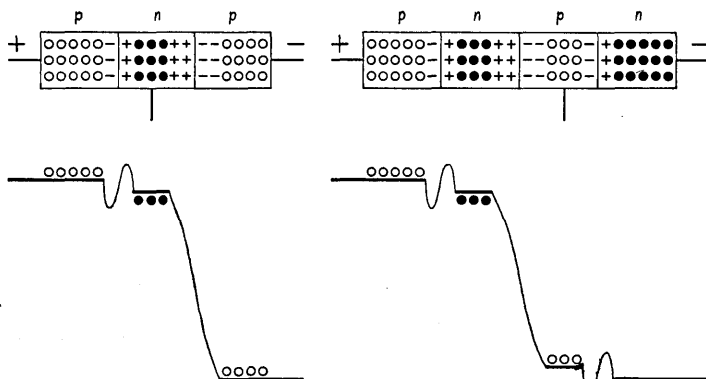


図 6

図 7

位は上昇することとなり、堤防のところの電位分布のくぼみは、埋めたてられて浅くなってゆくこととなる。

やがて、そのくぼみが埋めつくされてしまうと、それまで堤防（電位のくぼみ）の存在によって、（－）側から（＋）側への進出が阻まれていた（－）側の電子が妨げられることなしに（＋）側に向かって流れ出ることが可能となる。

さらに、この流出電子流の実現により、つぎの事態をもたらすに到る。流出電子が、電位の傾斜面に添って、その下面を這い上ってゆくと、堤防（Ⅰ）に到達してそこに貯わえられる。この堤防（Ⅰ）は電位の丘をなしているの、電子流の到来によって電位が引き下げられ、電位の丘は溶け崩されるように修正されてゆくこととなる。

堤防（Ⅰ）が、やがて消失してしまうに到ると、後続電子流はそれをふんまえてそこを素通りし、（＋）電源端子へと流れ込む。ここにはじめて、電子による貫通電流が実現し、かつ、それが持続する。

一方、堤防（Ⅰ）が存在しているばかりに、いままでも流下できずにいた（＋）側のホールも、堤防（Ⅰ）の消去とともに行動を起こしうる自由の身となり、電位の傾斜に添ってその上面を転がり落ちることとなる。

すでに、埋め戻されている堤防（Ⅱ）を素通りして、これまた（－）電源端子に流入して、ホールによる電流も実現し、かつ、それが持続する。

これで、電子による電流もホールによる電流も、成立し、導通が完成したことになり、オンの状態となったわけである。

さて、この段階で、もしゲート・パルスが断ち切られたとする。当然、堤防（Ⅱ）は本来の空乏層に立ち帰るべく、負電位のものくぼみを再現する電位分布に戻ろうとするはずである。

しかし、たとえゲート・パルスによる+電荷の注入が期待できなくなっても、なおそれに代る（+）側か

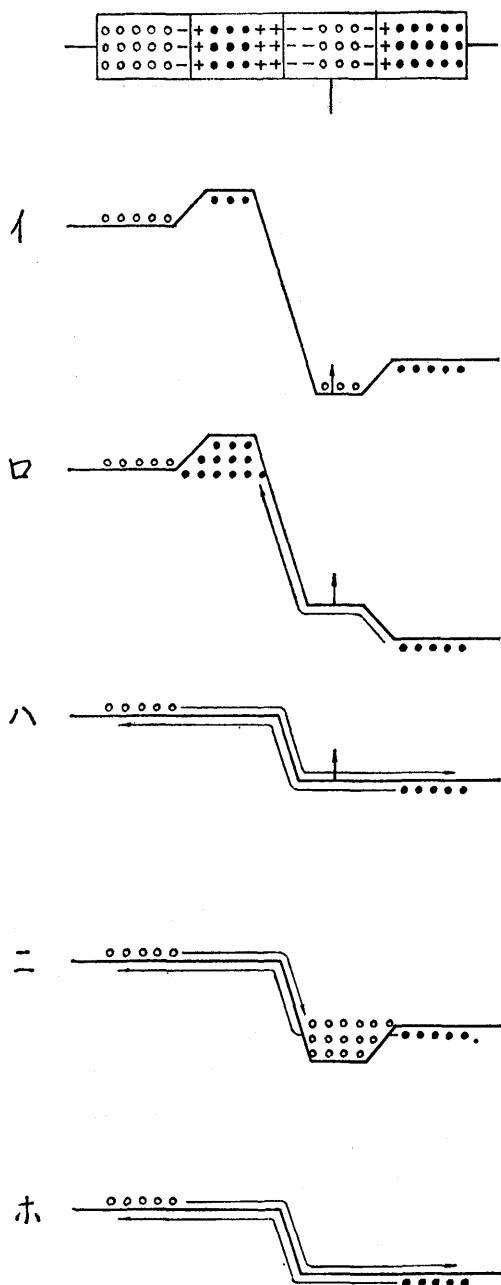


図 3

らのホールの流入があるので、依然として堤防（Ⅱ）は復元しえず、電子による電流が自続する。したがって、堤防（Ⅰ）の切り崩し状態というものそのまま保持され、ホールによる電流も自続する。

つまり、最初ゲート・パルスの印加によって、オフ状態からオン状態に事態が改まったのではあるが、つぎにそのゲート・パルスが除去されたからといって、再びオン状態から最初のオフ状態に復元はしないものであることが読み出される。

ちなみに、SCRの場合のみならずトランジスタの場合にもそうであるが、上述のような電子やホールの流れを期待し、それらに逆行するホールや電子の流れを無視して問うを要せぬというためには、不純物濃度の違いがあらかじめ与えられていなければならないはずである。

バリアのみならずキャリアまで形成するに到るか、単にバリア形成のみにとどまるかは、その接合の濃度の高低に支配されていることであり、かなり裁然たる濃度差を必要としていることがうかがわれる。

この濃度差ということの存在をぬきにしては、原理的説明といえども不備になってしまう恐れがある。このことは初めて学ぶ者にとって、ややもするとあまり込む迷路の1つとなっているので、留意しなければならぬ事柄であろう。

さて、上記図2の状態図で、一応SCRについてもトランジスタなみの図解を得たことになるわけである。しかし、それは動作前の状態描写にとどまるもので、動作そのものを判読させるものではない。

そこで、オフ状態からオン状態への転移過程を、5葉の状態図で連記することを試みた。その結果は図3(イ)、(ロ)、(ハ)、(ニ)および(ホ)に示すごとくである。図示の通り、一見して動作が読み取れるので、もはや、解説を添記するまでもないし、この段におよんで解説文の介入は、かえってじゃまにすらなる。

元来、図解というからには、解説文の添記に頼るのは邪道であって、図示のみで成るのが建前である。その意味で、ここでも、これ以上の蛇足はつけ加えないこととする。

4 2つの難点

上述の図解には、2つの致命的不都合が内在している。1つには、オン状態になったものを、再び元のオフ状態に戻さんとして、電源を一旦切った上さらに再投入したとしても、これでは元のオフ状態に復元しえない点である。電源から切り離されたとしても、堤防

は埋め戻されたままとなっていることになるので、電源の再投入で、またもオンの状態が再現してしまうこととなり、最初のオフ状態までさかのぼった復元とはなりえない。これは実際に符合せぬ結果である。

もう1つは、トランジスタの図解でもそうであるが、ゲートにパルス無き状態で(－)電源端子よりもさらに低電位に在るという点である。これも事実こそぐわぬ無理な表現である。

第1の難点(電源一旦遮断後の再投入で、オフ状態に復元できぬという難点)：——もともと、空乏層内に存在するホールと電子は、再結合可能な領域内に在るわけであるから、この領域内に在るホールや電子は、再結合による中性化が常に営まれているはずである。

図上でも、堤防の傾斜線がそれを暗示しているといえる。たとえば図4にて、鉛直線は同位の位置を意味

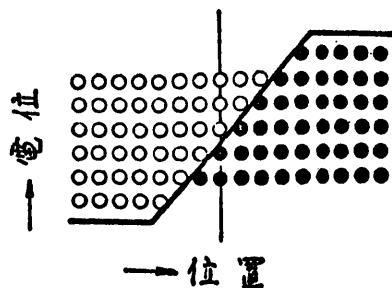


図 4

し、ホールと電子が混在していることを物語っている。また、水平線は同一電位を意味し、ホールや電子がたがいに自由に行き交う間柄にあるわけである。

さらに、図の斜線は、ホールを高電位側、電子を低電位側にしわけしているので、再結合が積極的に促進される状態に置かれていることがうかがわれる。逆の傾斜線においても、また同様の事情にある。

ゆえに、一旦電源を切ることによって、両極からのホールや電子の補給が止まってしまうと、堤防を埋め戻していたホールや電子は、再結合だけが持続してなし崩しに自滅してしまうに到るものと解することができる。

つまり、埋め戻されていた堤防というのは、再結合という支出と補給という収入とのバランスの上に立ったダイナミックな平衡状態に他ならないのである。

ここに、補給という一見平凡な事柄が事態を支えているかなり重要な1要因をなしているものなることも見逃すわけにいかない気がする。

上述せるところから、電源の一時遮断後の再投入

で、オフ状態の復元が期待できることが了解されるに到った。

第2の難点(堤防頂点の電位の表現が現実こそぐわぬという難点)：——空乏層内の格子イオンが、矩形状に分布しているものとすれば、それに基づく電位分布は放物線状となるはずであり、これに加電圧の直線傾斜が重畳されることとなる。

すなわち、図5にて矩形状電荷分布がa-曲線のご

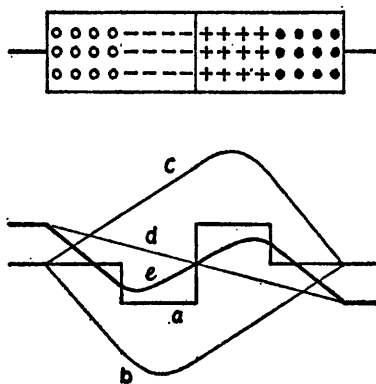


図 5

とくであるとするれば、その正負電荷分布による正負それぞれの電位分布はb-曲線、c-曲線となり、また、電源電圧による電位分布はd-曲線のごとくなるので、総合代数和はe-曲線のようなになる。これが現実の電位分布である。

ただし、ここで重量で扱うにあたって、リアであるという条件を叶えさせるために、空乏層の幅は総合状態時の幅を一貫して準用するものとする。

したがって、前掲図1や図2は、それぞれ図6および図7のごとく書き改めらるべきものとなってくる。これはあたかも、床下浸水対策として、家屋の土台を高くしてゆくのではなく、土塀を築いて防いでいるのに似ている。ここではこの両図とも、見やすく描くために若干誇張してある。

ここではじめて、堤防の天頂が高くなくともその波打ちぎわでさえ高さが保たれておれば、堰き止め実現可能なることが認められ、第2の難点も一応救えることになる。

以上2点の吟味結果、疑義のない態でこのモデルをオン・オフ動作の図解に使えることが判った。結局図7の要領で描く必要があるわけであるが、これではかなりこみ入りすぎていて、かえって、図解としての素朴さを失わしてしまう懸念がある。残念なことなが

ら、実用上からは多少の不精密があってもやはり図2に戻るのが無難でなかろうかと思われる。

要するに、初めて学ぶ者に対し図2で‘状態’の印象を強く訴えれば、図3の‘動作’は必然的に容易に想起されてくると期待されるのである。

5 関連事例

つぎに、このモデルがどこまで実態に即応できるものなるかを確かめる意味で、トンネル・ダイオードをこのモデルで扱ってみた。その結果は、図8(i), (ii)および(iii)のごとくである。

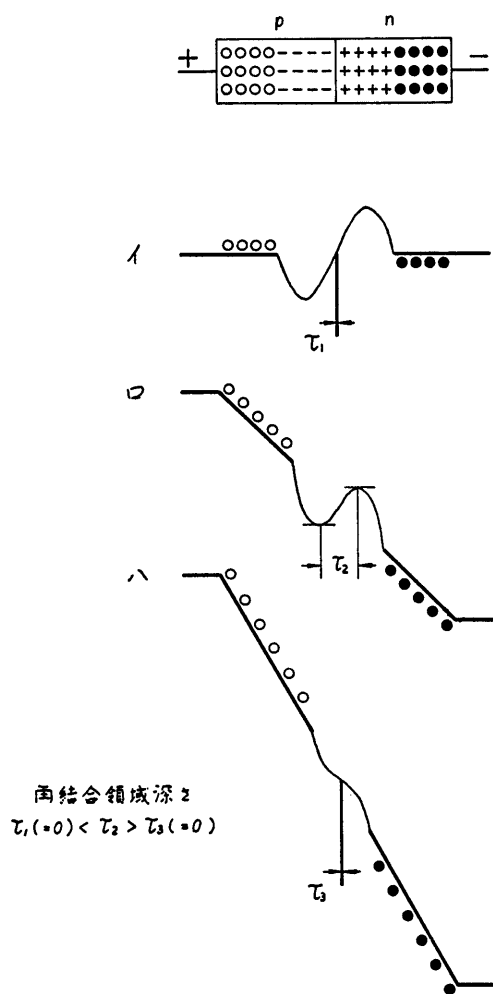


図 8

加電圧強化とともに、空乏層の幅が狭ばまり、かつ直線分布が急傾斜となってゆくことから、両極間電位分布が相似性を保ったまま増長してくるというのでは

なく、新たな事態に変転してしまいうに到るという必然性が見出される。図中 τ で示せる再結合促進領域深さの消長が、極大を呈しているのはそれを物語っている。

ここに、かの負性抵抗をもたらしている直接の主因は、再結合の消失してゆく過程として理解されてくることとなる。

また、逆方向導通では、図9のごとく直線傾斜と放物線分布の消長が同調しているので、事態が改まると

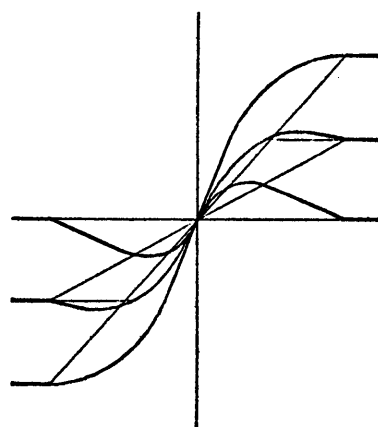


図 9

いうことは起きえない事情に在ることが認められる。なお、埋め戻し進出のためと、いちぢるしい強電界のために、正負格子イオン同志がたがいに電子の過不足を補い合い、実質的にイオン間の再結合に似た新たな事態が実現し、逆方向でありながら導通の激しいものとなってくると解される。

つぎに、太陽電池の動作をこのモデルで描いてみると、図10のごとくである。光の入射によって接合界面

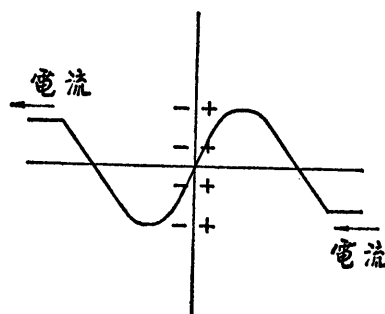


図 10

における格子イオン同志の過不足電子の授受が促進され、その復元のための補充は、(+)端子側にホール

を、また(－)端子側に電子を過剰ならしめることとなる。

この結果は、外部回路に対し電源としての電流を実現せしむるに到る。また、それが度を越すとついには内部閾値でオーパフローしてしまうであろうことが認められる。

最後に、サイラトロンとSCRの照合について言及すると、サイラトロンにては電離も再結合も存在しているが、SCRにはこの段階では電離がなく、電極からの補給と再結合が存在しているのみである。

したがって、サイラトロンとSCRの類似性は、電離の存在に帰し難く、再結合の存在に留意すべき事柄というべきである。この再結合や補給というのが、単に消イオンの上でのみならず後続電流の上でも、その成因として重視しなければならぬものとなっていることがうかがわれる。

6 結 言

SCRのオン・オフ動作原理を、もっとも実感に訴えやすい電位分布と導通の担い手である電子とホール

だけで図解せんとを試みは、一応可能性を見出すことができるに到った。以上の記述には、一切フェルミ準位やトンネル効果等の用語を使わずに済ましている。

動作原理の第1近似的イメージだけならば、前掲図2とか図3が便利と思われる。図7では煩雑さが加わってくるので、それだけ図解としての迫力がそがれてしまう心配がある。したがって、この程度の表現に踏みとどまるべきであろう。

本来、図解というからには、解釈説明文の添記などを必要としないはずのものでなければならぬ。本稿の図解もまたそうした完璧の域には到達しえていないので、さらに吟味を重ねてゆく必要が感ぜられる。

そして、図解の持つ威力を遺憾なく発揮しえた描写完成への努力は、現在一般に原理の理解が困難であるとの巷の苦情を解消する上で、軽視できない緊要なことと思われる。これが、本稿の通俗的事柄にとどまるものでありながらも、あえて1つの試みとして提案せる所以である。

本件に関し、種々ご意見を惜しまれなかった、多くの方々に謝意を表します。